

УДК 621.833.001

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕДУКТОРА НА ДИНАМИКУ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА

В.С. Янгулов

Томский политехнический университет

E-mail: dtps@lpg.tpu.ru

Представлены результаты динамических испытаний электромеханического исполнительного органа, входящего в состав системы ориентации космических аппаратов. Определены передачи, повышающие точностные параметры прибора. Приведена конструкция редуктора привода вращения рамок карданова подвеса со встроенным в его кинематическую цепь демпфирующим устройством, обеспечивающим требуемую точность на длительный ресурс.

Ключевые слова:

Электромеханический исполнительный орган, прецизионный редуктор, карданов подвес, демпфирующее устройство, динамические испытания, точностные параметры, ресурс.

Высокие требования к космической технике определяют параметры всех блоков и узлов, входящих в состав космического аппарата. Основным параметром для космического аппарата является высокий ресурс. Одним из блоков, определяющих работоспособность космического аппарата, является система ориентации, в которую входят и электро-механические исполнительные органы (ЭМИО). В некоторых из них применяются приводы вращения рамок (ПВР) карданова подвеса. Прогрессивным направлением в создании приводов ПВР является электромеханический редукторный привод.

На рис. 1 приведена кинематическая схема ЭМИО. Двигатели с маховиками — 1 и 8 размещены в кардановом подвесе — 3, обеспечивающим их поворот по двум осям α и β относительно основания — 7. По каждой из осей установлены электроприводы поворота рамок карданова подвеса — 4 и 9, а также высокоточные датчики положения — 2 и 10 общей оси двигателей — 1 и 8 относительно основания — 7. В состав электроприводов входят шаговый двигатель (ШД) — 6 и редуктор — 5.

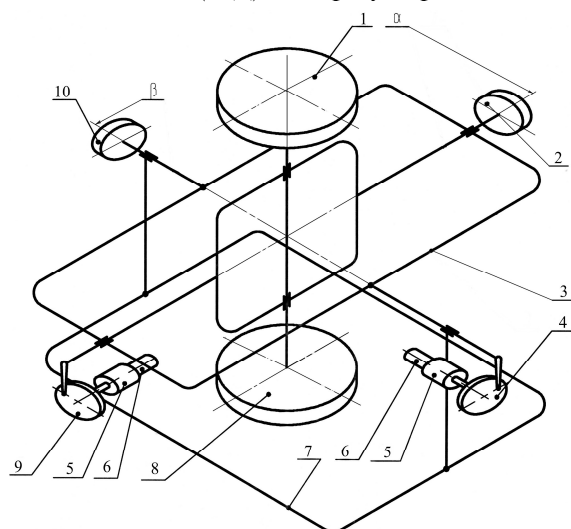


Рис. 1. Кинематическая схема электромеханического исполнительного органа

Проведённый анализ зубчатых передач, разработка, изготовление и результаты исследований ряда конструкций редукторов позволили сделать выбор передач и механизмов, использование которых в конструкции редуктора наиболее полно удовлетворяет требованиям, предъявляемым к нему, как функциональному узлу ЭМИО [1, 2].

Для проведения предварительных динамических испытаний были разработаны и изготовлены три варианта редуктора, состоящих из:

- волновой плунжерной передачи с разрезным подпружиненным жестким колесом и кулачковым механизмом (ПВР-2);
- пяти пар цилиндрических мелко модульных колёс и кулачкового механизма (ПВР-1);
- волновой передачи с промежуточными телами качения (шарики), волновой передачи с промежуточным телом (змеевидной пружиной) с упругим натягом в зацеплении и кулачкового механизма (ПВР).

Необходимо отметить то, что с целью ускорения испытаний при изготовлении первого образца редуктора (макета) ПВР был снижен ряд требований к деталям волновой передачи с шариками (увеличены допуски, снижена твёрдость и шероховатость рабочих поверхностей и т. д.).

За основу методики динамических испытаний взято определение положения подвижной части работающего прибора относительно основания при программном управлении приводами, т. е. экспериментально определялась ошибка между фактическими и номинальными угловыми перемещениями подвижной части ЭМИО.

Испытания проводились по следующей программе:

1. Определение линейности перемещений рамок карданова подвеса синхронно с управляющими импульсами, подаваемыми на шаговый двигатель с разными частотами при неработающих двигателях с маховиками.

2. Испытания по п. 1, при работающих двигателях с маховиками.
3. Регистрация колебаний подвижной части прибора по перекрёстной оси, при работающих двигателях с маховиками.

Испытания по п. 1 дают возможность определить нелинейность движения выходного вала без влияния динамики ЭМИО, что характеризует точность редуктора. Результаты по двум другим пунктам позволяют оценить качество редуктора с учётом динамики работающего прибора.

При управлении прибора с частотой вращения ротора ШД до 2,5 Гц, что соответствует его угловой скорости до 10 об/мин, перемещения замерялись по обеим осям карданова подвеса. При больших скоростях вращения ротора ШД (до 1000 об/мин) контроль проводился только по перекрёстной оси. Для этого сигнал, поступающий с датчиков положения, усиливался до хорошо различаемых размеров на регистрирующем приборе. Вследствие этого контролируемый интервал перемещений был ограничен. Контроль по перекрёстной оси позволяет косвенно определить характер перемещений по амплитуде колебаний подвижной части прибора на всём диапазоне угла прокачки карданова подвеса.

Разрешающая способность системы «датчик-усилитель» обеспечивает качественные замеры, так как при управлении приводами с малыми угловыми скоростями требуется очень высокая точность перемещений подвижной части прибора, с погрешностью не более 3 угл. сек. за один шаг ротора ШД в любом режиме, включая и реверс. Нелинейность перемещений также не должна превышать величины этой погрешности

Экспериментальное исследование влияния качества редуктора на динамику ЭМИО проводилось на установке (рис. 2), состоящей из прибора, блоков автоматики для управления узлами прибора и устройств усиления и записи сигналов датчика положения подвижной части относительно неподвижного основания. По каждой оси карданова подвеса прибора установлены, помимо приводов, высокоточные индукционные датчики положения с линейным сигналом на выходе, пропорциональным углу поворота по оси. Усилением сигнала с датчика можно получить высокую разрешающую способность замера угла поворота, практически до 1 угл. сек. Устройство для усиления и записи сигналов с датчиков представляет собой электронный усилитель с линейной характеристикой и выходом на регистрирующий прибор.

Ограниченный интервал проверяемых перемещений не позволяет контролировать весь диапазон угла прокачки карданова подвеса, но для большей достоверности замеры проводились на нескольких таких интервалах (не менее 8) в произвольных положениях. При обработке результатов исследований принимались во внимание только наилучшие из них.



Рис. 2. Установка для испытаний ЭМИО

На этапе макетирования ЭМИО был проведен большой объём предварительных испытаний по определению его параметров. В результате этих исследований обнаружены следующие явления, недопустимые при штатной эксплуатации прибора и ухудшающие его точностные характеристики:

- движение рамок карданова подвеса происходило несинхронно с движением ротора ШД, рассогласование в перемещениях достигало трёх шагов ротора ШД, при этом рамки обгоняли ротор или отставали от него;
- при перемещениях подвижной части прибора приводами возникали колебания подвижной части с частотой около 5 Гц и амплитудой до 1,5 угл. мин.

При анализе результатов испытаний установлено, что основными причинами возбуждения колебаний являются:

- неравномерное движение входного вала редуктора из-за нелинейной скорости ротора ШД;
- не сглаживание угловой скорости ротора ШД кинематической цепью редукторов ПВР-1 и ПВР-2.

Волновые передачи блока ПВР обеспечили существенное улучшение перечисленных параметров привода, во-первых, из-за достижения минимального мертвого хода на весь период эксплуатации регулированием зазоров и созданием упругого натяга в зацеплении [3] и, во-вторых, за счет обеспечения достаточной энергоемкости упругих элементов для диссипации избыточной энергии ШД.

Для подтверждения этих выводов по анализу результатов испытаний на рис. 3 и 4 приведены примеры записей перемещений и колебаний подвижной части ЭМИО при управлении макетами приводов.

Основным результатом предварительных динамических исследований стал выбор тех передач, которые могут обеспечить заданные требования к редуктору и к прибору. Наряду с этими исследованиями проводились и ускоренные испытания на

ресурс редуктора [4]. В комплексе результаты этих исследований позволили сделать вывод о перспективности волновых передач с промежуточными телами (шарики и змеевидная пружина) для их использования в прецизионных редукторах повышенной долговечности.

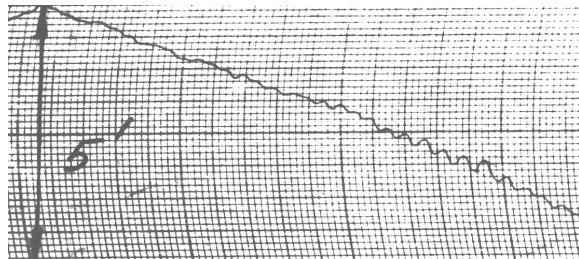


Рис. 3. Движение рамки карданова подвеса, управление приводом ПВР-2, частота вращения ротора ШД – $f=30$ Гц

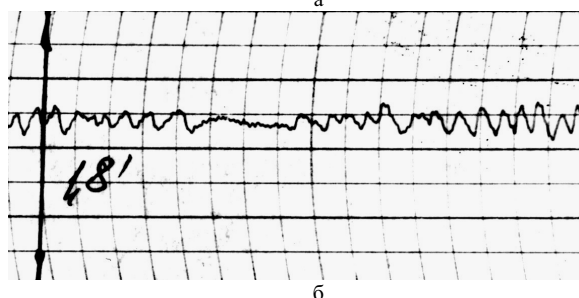
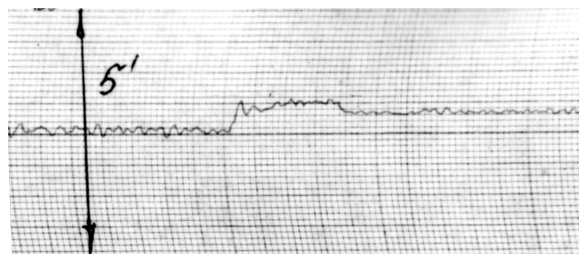


Рис. 4. Колебания подвижной части ЭМИО при частоте вращения ротора шагового двигателя $f=150$ Гц, управление приводами: а) ПВР-2; б) макетом ПВР

Следующий этап работы – разработка конструкции редуктора на базе выбранных передач [2].

Разработанная конструкция редуктора обеспечила согласованное перемещение подвижной части прибора при управлении приводами, погрешность перемещений не превышала 2 угл. сек., включая и режим реверса. Амплитуда колебаний существенно снизилась, но превышала допустимое значение почти в 4 раза. Поэтому было принято решение о демпфировании колебаний.

Подбиралась оптимальная конструкция демпфирующего устройства и его размещение в кинематической цепи ЭМИО. В результате анализа было выбрано два варианта демпфирующих устройств:

1. Вязкий демпфер, ротор которого крепится к подвижной части карданова подвеса, а корпус на неподвижной [5].
2. Демпфирующее устройство, установленное в теле выходного звена редуктора (рычаге).

Отметим, что 2-й вариант имеет ряд преимуществ перед 1-м, главным из которых является то, что одновременно выполняются две функции: демпфирование колебаний привода, приходящих на рамку карданова подвеса, и демпфирование колебаний подвижной части ЭМИО.

При испытаниях по 1-му варианту устанавливались два типа демпфера: камерный и поплавковый. Удельный коэффициент демпфирования камерного $k_1=500$ Н·мс/рад, поплавкового $k_2=1$ Н·мс/рад.

По 2-му варианту были проведены работы по определению материала рабочего тела, размеров деталей и рабочих зазоров. Выбор оптимальных параметров демпфирующего устройства проводился экспериментально, т. к. достоверных данных по требуемой информации не удалось обнаружить. В результате исследований по выбору рабочего тела, наилучшие показатели по демпфированию колебаний были получены при использовании полиметилсиласановых жидкостей типа ПМС.

На рис. 5 представлена конструкция демпфирующего устройства. Суть устройства состоит в том, что его подвижная часть (ротор) расположена в неподвижном корпусе с минимальными зазорами, которые заполнены высоковязкой жидкостью. Рычаг выполнен из двух частей, которые соединены между собой через демпфирующие устройства. Ротор и корпус устанавливаются каждый на свою часть рычага.

Ротор амортизатора состоит из втулки – 6 и вала – 12, который крепится винтами – 13 к части рычага – 1. Корпус – 7 закреплён винтами – 10 к части рычага – 3. Герметизация внутренней полости амортизатора осуществляется резиновой прокладкой – 11, которая зажата между буртиком вала – 12 и втулкой – 6, а также торцами корпуса – 7 и рычага – 3. Между корпусом – 7 и втулкой – 6 имеются зазоры, которые заполняются высоковязкой жидкостью ПМС-15000. Заливка жидкости проводится через отверстия в корпусе – 7, с предварительным вакуумированием герметичной полости демпфирующего устройства. После заливки отверстия – 9 заглушаются винтами и запаиваются.

Чтобы создать при перемещениях ротора относительно корпуса дополнительное сопротивление протеканию жидкости в зазорах между ними, на втулке – 6 выполнены кольцевые канавки, в которых расположены разрезные упругие кольца – 5.

Для обеспечения нормальной работы амортизатора рычаг – 3 крепится на рычаге – 1 с возможностью перемещения. Под винты – 4 установлены втулки – 2, высота которых определяется таким образом, чтобы зазор между рычагами находился в пределах 0,01...0,03 мм. В рычаге редуктора ПВР (рис. 6) установлены два демпфирующих устройства, при этом жестко закрепленные валы – 12 на рычаге – 1 проходят в отверстиях рычага – 3 с минимальным зазором, который ограничивает их перемещение относительно друг (рис. 5, а).

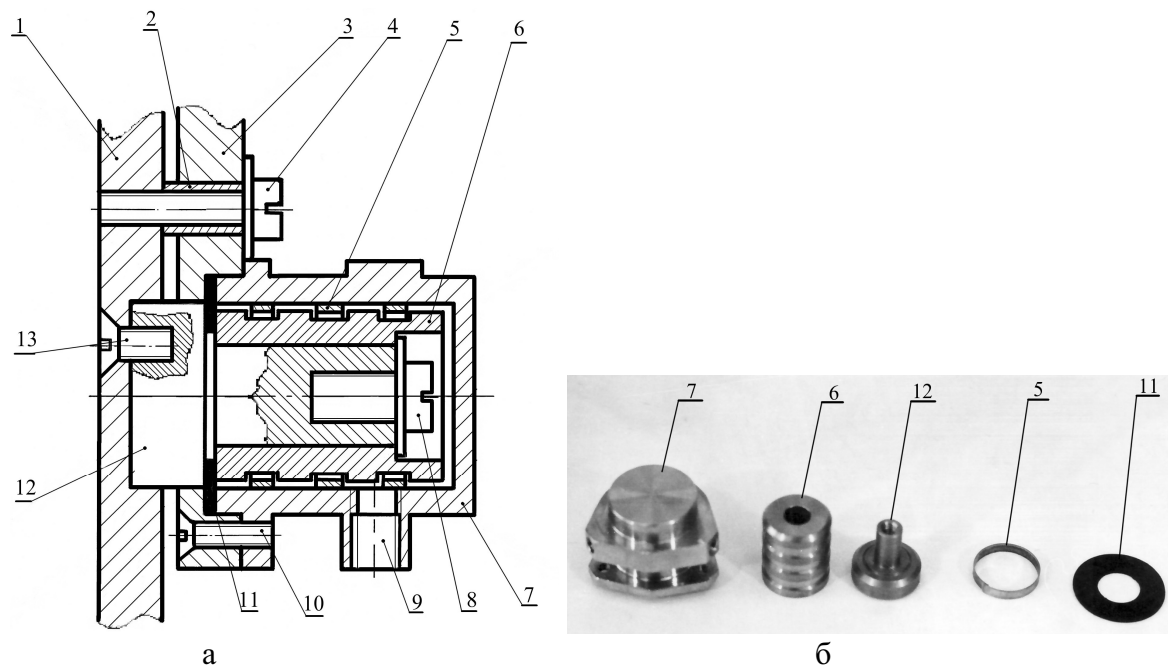


Рис. 5. Демпфирующее устройство: а) чертёж общего вида; б) основные детали

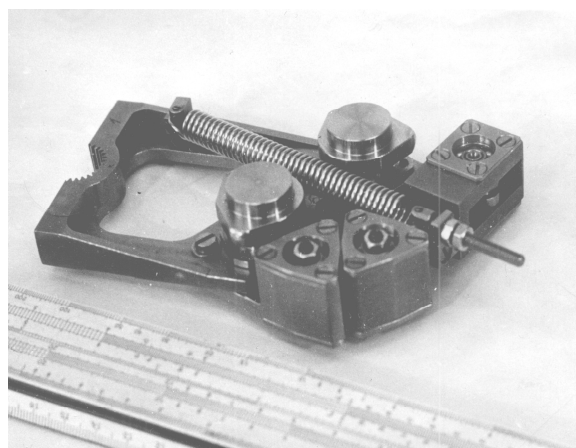


Рис. 6. Рычаг с демпфирующими устройствами

На рис. 7 приведены записи перемещений рамок карданова подвеса прибора с доработанным редуктором. За один шаг ротора ШД номинальное перемещение рамки карданова подвеса составляет 4,32 угл. сек. Сделать количественный анализ точности перемещений по данным записям сложно, но результаты работы [4] подтверждают, что погрешность перемещений за каждый шаг не превышает 1 угл. сек., даже после наработки редуктора на ресурс. Можно отметить, что неравномерность вращения ротора ШД при работающих двигателях с маховиками приводит к колебаниям подвижной части прибора (рис. 7, б), но они гасятся демпфером, размещённым в рычаге редуктора.

Пример записи колебаний подвижной части ЭМИО при управлении приводом с редуктором с установленными демпфирующими устройствами, представлен на рис. 8. Очевидно резкое уменьшение амплитуды колебаний.

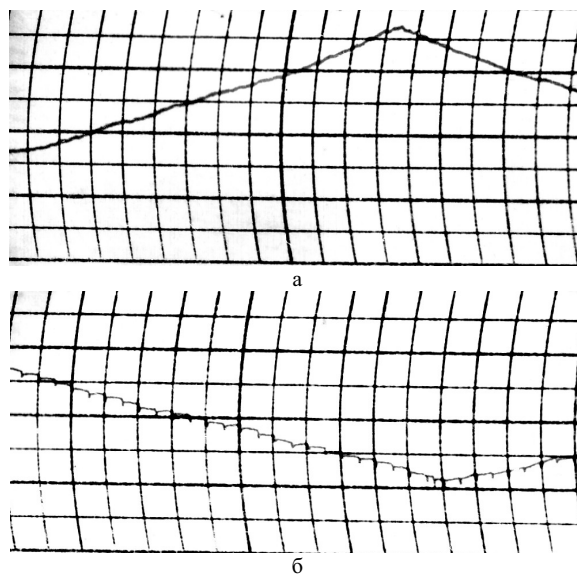


Рис. 7. Перемещения рамок карданова подвеса прибора при частоте вращения ротора ШД $f=5$ Гц: а) двигатели с маховиками не работают; б) двигатели работают

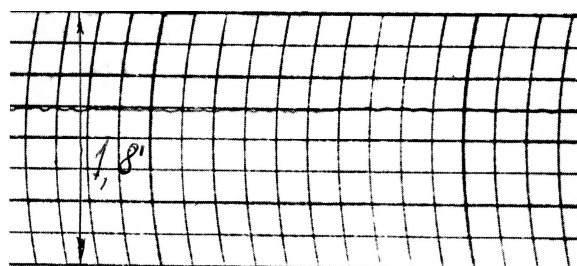


Рис. 8. Колебания подвижной части ЭМИО при частоте вращения ротора шагового двигателя $f=150$ Гц, управление приводом ПВР с демпфирующими устройствами

Графически оформленные результаты динамических испытаний по обоим этапам, показанные на рис. 9, наглядно показывают влияние параметров редукторов, прежде всего мёртвого хода, на динамику прибора. Введение в кинематическую цепь редуктора демпфирующего устройства обеспечивает снижение амплитуды колебаний входного и выходного валов.

Зависимости 1–3 получены соответственно для редукторов 1–3 вариантов на предварительном этапе испытаний, связанным с выбором передач, которые наиболее удовлетворяют заданным требованиям по точности перемещений подвижной части прибора при управлении приводом.

Результаты исследований по созданию демпфирующего устройства представлены линиями 4–8, где:

- 4 – с редуктором 1-го варианта и демпфером с k_1 ;
- 5 и 6 – с редуктором 3-го варианта и демпферами с k_2 и k_1 , соответственно;
- 7 и 8 – с редуктором 3-го варианта и демпфирующими устройствами, в которых использованы разные по вязкости жидкости ПМС (7 – ПМС-12000 и 8 – ПМС-50000).

Амплитуда колебаний подвижной части ЭМИО с доработанными редукторами приводов ПВР показана линией – 9. Как видно из рисунка, в итоге проведённых исследований и сделанных доработок конструкции редуктора удалось достигнуть допустимого значения амплитуды по ТЗ (линия – 10).

Полученные результаты динамических испытаний ЭМИО по определению влияния параметров редуктора ПВР на его точность позволяют сделать следующие выводы:

1. Мёртвый ход кинематической цепи должен быть минимален на весь ресурс, и наиболее полно это условие обеспечивается волновыми передачами с промежуточными телами.
2. Демпфирующее устройство, встроенное в кинематическую цепь редуктора, позволяет снизить амплитуду колебаний подвижной части прибора при управлении приводом и гасить их при работающих двигателях с маховиками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Янгулов В.С., Дмитриев В.С., Гладышев Г.Н. Малогабаритный редуктор повышенной точности и долговечности системы ориентации космических аппаратов // Навигационные спутниковые системы, их роль и значение в жизни современного человека: Труды Всеросс. научно-техн. конф., посвященной 40-летию со дня запуска на орбиту навигационного КА «Космос 192» и 25-летию запуска первого КА «Глонасс». – Красноярск, Железногорск, 2007. – С. 270–273.
2. Янгулов В.С. Прецизионный редуктор повышенной долговечности // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 311. – № 2. – С. 18–23.
3. А.с. 154746 СССР. МКИ³ F16H 1/00. Волновая передача / Г.Н. Гладышев, В.С. Янгулов, А.Е. Беляев, Н.В. Коробейников. Заявлено 20.12.1978; Зарегистр. 2.02.1981.
4. Янгулов В.С. Ускоренные испытания прецизионного редуктора на ресурс // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 313. – № 2. – С. 28–31.
5. А.с. 213528 СССР. МКИ³ G01C 19/00. Силовой двухступенной управляющий гироскоп / В.С. Янгулов, Г.Н. Гладышев, В.С. Дмитриев, Э.Д. Станько. Заявлено 05.03.1984; Зарегистр. 03.01.1985.

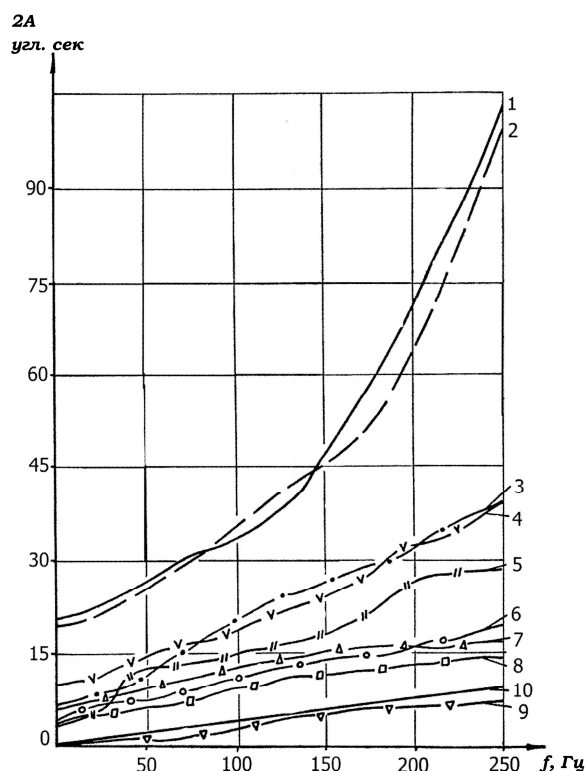


Рис. 9. Зависимость амплитуды A колебаний ЭМИО от частоты вращения ротора f шагового двигателя с различными редукторами приводов

Заключение

Динамические испытания редуктора привода вращения проводились в процессе разработки электромеханического исполнительного органа. Это позволило вносить корректировку в конструкцию редуктора и контролировать влияние этих изменений на качество прибора, что существенно сократило сроки его разработки.

Полученные результаты легли в основу методики динамических испытаний штатных приборов, которая обеспечивает качественный контроль при сборке и настройке точностных параметров изделия.

Поступила 29.01.2008 г.